

双箱法测定墙体材料导热系数的研究

解放军理工大学 朱培根[☆] 杨 军 楼冬冬 罗春成 祝丹妮

摘要 介绍了双箱法测定墙体材料导热系数的原理,给出了测试实例,分析了理论误差。该方法测试精确度较高。

关键词 双箱法 墙体材料 导热系数 电加热器

Measurement of thermal conductivity of wall material by bi-box approach

By Zhu Peigen[★], Yang Jun, Lou Dongdong, Luo Chuncheng and Zhu Danni

Abstract Presents the principle of this approach, gives a testing example, and analyses theoretical error. The precision of this method is higher.

Keywords bi-box method, wall material, thermal conductivity, electric heater

[★] PLA University of Science and Technology, Nanjing, China

①

0 引言

墙体材料的导热系数是表征建筑物导热性能的一个重要参数,准确测定墙体材料的导热系数有助于估算通过围护结构的传热量,从而有助于确定整个空间的空调负荷,为热舒适性、空调系统选择、空调节能等提供可靠的依据。目前,国内外主要采用热流计法和基于此原理做成的导热系数测试仪测定墙体材料的导热系数。本文采用“双箱法”,通过多次改变箱体内的温度来测定墙体材料导热系数,避免了传统测试法测不准的弊病。

1 测试原理

双箱法原理如图 1 所示。测试装置主要由半球的外箱、半球的内箱和两个电加热器构成。外箱和内箱内分别放置电加热器 7 和电加热器 6。电加热器 6 的作用是使内箱维持温度 t_1 ,并使产生的热量全部用于通过内箱所覆盖的外墙面的传热;电加热器 7 的作用是保证内、外箱之间区域的温度与内箱内的温度相同。

1.1 双箱尺寸的确定

内箱和外箱均设计为球体,外箱和内箱尺寸的确定以保证图 1 中内箱罩住的墙体材料在厚度方向上一维导热为前提,对图 1 中的 2 部分进行网格划分,利用 MATLAB 编程进行计算,得出 2 部分

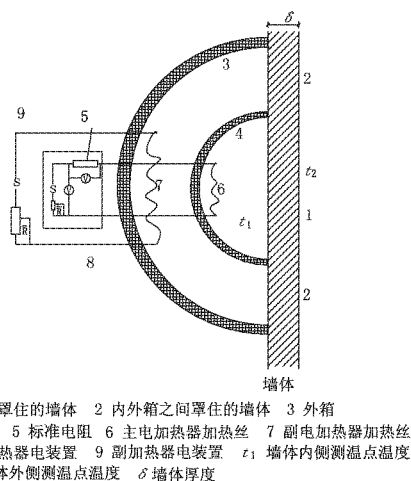


图 1 双箱法原理图

高度的最小值为墙体材料厚度的 1.9 倍,取整数为 2 倍;内箱半径为墙体材料厚度^[1]。此时 1 和 2 之间无热量传递,从而保证 1 部分的热量传递为一维导热。

①[☆] 朱培根,男,1964 年 7 月生,工学博士,教授
210007 解放军理工大学工程兵工程学院内部设备教研室
(025) 84853846 (0) 15895887999
E-mail: zhupeigen0713@163.com

收稿日期:2008-06-10

一次修回:2008-12-08

二次修回:2009-11-10

由于内、外箱之间区域的温度与内箱内部的温度始终保持相等,1 与 2 之间也不会发生热量传递,故内箱的热量只能向墙体材料厚度方向传递。

当外箱半径远大于墙体材料的厚度时,热量传递也可以简化为沿厚度方向的一维传递,一般情况下外箱的定型尺寸与墙体材料厚度 δ 的关系满足式(1)时^[1],可得到一维的温度场。

$$\delta \leq \frac{1}{3} r_{\text{外}} \quad (1)$$

式中 $r_{\text{外}}$ 为外箱半径, m。

1.2 温度测量

两箱内的温度和墙体材料的温度用热电偶来测量^[2]。热电偶的主要优点是简单和通用,选择热电偶材料时应注意,热电偶所能产生的热电势较大,而在重复加热时,热电偶的特性变化不大,此外还必须考虑热电偶工作的温度条件,在本装置中采用镍铬-镍铝热电偶,因为带有铜热电极的热电偶中的铜会迅速氧化而不能应用于高温下,并且镍铬-镍铝热电偶在所测试温度范围内的灵敏度为 $7 \sim 11 \mu\text{V/K}$ 。

在选择热电偶时还应注意,热电偶材料的导热系数必须接近于所测试墙体材料的导热系数。要求沿热电偶热电极散发出的热量比起计算热流来必须小到可以忽略不计。在热电偶的热接点处,由于两个热电极的导热系数不同,可能产生温度场的不均匀性,适当选取热电极的直径可消除这类误差。

用热电偶分别测量内外箱之间区域气体的温度、内箱内气体的温度、内外箱之间墙体材料内表面温度、被内箱罩住的墙体材料内表面的温度及相应的外表面温度。

为了精确测量温差,采用差接式多接点热电偶,即若干副串联的热电偶组。偶数接点连成一束,奇数接点连成另一束,接点有电绝缘。

墙体材料的传热属于不稳定传热,由于温度波的时间延迟,在同一时刻测得的内箱温度和外界温度在时间上并非吻合。另一方面,由于墙体材料的蓄热作用,由外表面进入墙体材料内部的热流与同一时刻由墙体材料内部到内表面的热流并非一致。为了消除这两个影响,测试时间应比温度波的延迟时间长,这样就可消除时间延迟带来的影响。

1.3 传热量的确定

内加热器:热量测量主要测量内箱的热流量 q ,

可通过测量加热器电流和电压降得到。为了精确测量热流,必须借助标准电阻,用电位差计法^[3]进行测量。标准电阻和内箱的加热器串联接入电路。只要用电位差计测量标准电阻和加热器上的电压降,即可由下式求得加热器的功率 w (热流 q):

$$w = q = \Delta UI = \Delta U \frac{\Delta U_N}{R_N} \quad (2)$$

式中 ΔU 为电加热器 6 的电压降, V; I 为标准电阻的电流, A; ΔU_N 为标准电阻的电压降, V; R_N 为标准电阻的电阻值, Ω 。

外加热器:该加热器主要是保证外箱内的温度与内箱相同,可通过调节副加热器的电流来满足这一要求,这样内箱中通过墙体材料的热量就等于式(2)中的计算值。

加热丝由镍铬丝做成,为了使电流密度均匀,把镍铬丝缝在石棉板上,两个加热丝有单独的供电和调节装置。

2 影响因素分析

由于外界温度的变化,在相同的供电条件下测量,测得墙体材料内、外表面的温差是变化的,必须采取措施,使外界的温度可视为恒定温度。可从两方面达到这一要求,一方面,取一个极小的时间间隔,这个时间间隔应大于温度波的延迟时间,在这个极小的时间间隔内可认为外界温度是不变的,通过调节加热器的电流值,可以分别得到在不同热流量条件下墙体材料的导热系数。测试 k 次,然后再求其平均值^[4],即

$$\Delta \bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta \lambda_i}{k} \quad (3)$$

式中 $\Delta \bar{\lambda}$ 为测试 k 次墙体材料导热系数的平均值, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; $\Delta \lambda_i$ 为第 i 次测试的墙体材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

另一方面,可以提高两箱内的温度,当内箱的温度远远高于外界温度时,外界温度的变化相对于内箱的温度是个同阶的无穷小量,这也足以消除外界温度变化带来的影响。

3 导热系数的确定

由导热量的计算公式可得

$$\lambda = \frac{q\delta}{\Delta t F_p} \quad (4)$$

式中 λ 为墙体材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; Δt 为

墙体材料内、外表面温差, $^{\circ}\text{C}$; F_p 为被内箱罩住的墙体材料的表面积, m^2 。墙体材料厚度可直接用游标卡尺测出。

把式(2)代入式(4)得

$$\lambda = \frac{q\delta}{\Delta t F_p} = \Delta U \frac{\Delta U_N}{R_N} \frac{\delta}{\Delta t F_p} \quad (5)$$

测试点位于南京市海福巷某楼(呈南北朝向)1层,测点布置在南向一间房间的北面墙上,墙体厚度 $\delta=25\text{ cm}$,由双箱的尺寸可确定出 $F_p=0.196\text{ m}^2$,标准电阻 $R_N=1\ \Omega$,调整滑动变阻器,使 $\Delta U_N=1\text{ V}$ 。5 min 后,测得墙体外测点温度 $t_2=17\text{ }^{\circ}\text{C}$,墙体内测点温度 $t_1=21.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,主加热器上的电压降 $\Delta U=2.45\text{ V}$,由式(5)计算得出 $\lambda=0.65\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。图 2 为南京市 4 月 25 日室外空气逐时干球温度及墙体材料导热系数。

由图 2 可知,导热系数基本在 $0.655\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 上下波动,最大值为 $0.698\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,最小值为 $0.627\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,波动最大幅度为 $0.043\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。可见,墙体材料导热系数随温度的变化是非常小的,其数据有效范围为 $0.627\sim 0.698\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。图 2 中导热系数发生小幅度的波动,是由于多孔材料的导热系数受湿度

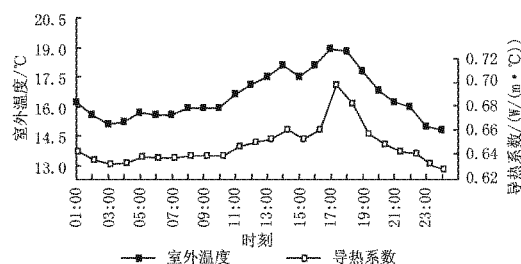


图 2 室外空气逐时干球温度及墙体材料导热系数

的影响很大,水分的渗入代替了相当一部分空气,更主要的是水分将从高温区向低温区迁移而传递热量,这就导致墙体材料的导热系数随着温度的变化而发生小幅度的变化^[8]。

4 理论误差分析

对式(5)两边取对数得

$$\ln \lambda = \ln \Delta U + \ln \Delta U_N + \ln \delta - \ln R_N - \ln \Delta t - \ln F_p \quad (6)$$

对式(6)进行全微分得

$$d(\ln \lambda) = \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{d\Delta U}{\Delta U} + \frac{d\Delta U_N}{\Delta U_N} + \frac{d\delta}{\delta} - \frac{d\Delta t}{\Delta t} - \frac{dF_p}{F_p} \quad (7)$$

于是导热系数测定值的综合误差就可以由式(8)确定:

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left[\frac{\Delta(\Delta U)}{\Delta U}\right]^2 + \left[\frac{\Delta(\Delta U_N)}{\Delta U_N}\right]^2} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{t_1 - t_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_p}{F_p}\right)^2 \quad (8)$$

把热电偶、电压表、游标卡尺的精度代入式(8),即得导热系数测定值的综合误差。

在实际应用中,用这种方法测得的导热系数的综合误差很小,说明用双箱法测得的墙体材料导热系数是可信的。

5 结语

用双箱法测得墙体材料的导热系数,简便易行,测试数据的采集精确,测试结果的可信度高,产生的系统误差小,更为重要的是可以调节测试的内外温度差,从而提高测试的精确度,它的适用性很广,既可以适用于稳定传热状态,又适用于不稳定传热状态。

参考文献:

- [1] (俄)奥西波娃 B A. 传热学试验研究[M]. 蒋章焕,王传院,译. 北京:高等教育出版社,1982
- [2] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调,2005,35(5):30-40
- [3] Verbeeck G, Hens H. Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable [J]. Energy and

- Buildings, 2005,37(7):747-754
- [4] Fan Y F, Gong L H, Xu X D, et al. Cryogenic system with the subcooled liquid nitrogen for cooling HTS power cable[J]. Cryogenics, 2005,45(4):272-276
- [5] Carslaw H S, Jaeger J C. Conductivity of heat in solids[M]. London: Oxford University Press, 1959: 143-165
- [6] 庄迎春,谢康,孙友宏. 砂土混合材料导热性能的试验研究[J]. 岩土力学,2005(2):261-26
- [7] 张旭,高晓兵. 华东地区土壤及土沙混合物导热系数的实验研究[J]. 暖通空调,2004,34(5):83-89
- [8] Austin W A. Development of an in situ system for measuring ground thermal properties[D]. Oklahoma: Oklahoma State University, StiUwater, 1998
- [9] 王唯威,淮秀兰. 分形多孔介质导热数值模拟分析[J]. 工程热物理学报,2007,28(5):835-837
- [10] 方肇洪. 隔热[M]//陈冠荣,等. 化工百科全书:第五卷. 北京:化学工业出版社,1993
- [11] 贾力,方肇洪,钱兴华. 高等传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2003